DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170137

金梦灿, 张舒予, 郜红建, 高时凤, 王宜坤. 麦秆还田下钾肥减量对水稻产量及钾肥利用率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170137
Jin M C, Zhang S Y, Gao H J, Gao S F, Wang Y K. Effects of reducing potassium fertilizer on yield and potassium use efficiency under wheat straw return conditions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170137

麦秆还田下钾肥减量对水稻产量及钾肥利用率的影响*

金梦灿[1], 张舒予[1], 郜红建[1**], 高时凤[2], 王宜坤[3]

(1. 农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室/安徽农业大学资源与环境学院　合肥　230036; 2. 庐江县郭河镇农技推广中心　庐江　200111; 3. 安徽喜洋洋农业科技有限公司　庐江　200111)

摘　要: 我国土壤缺钾程度日益加重, 作物秸秆中钾素含量较高, 还田后可替代部分化学钾肥, 缓解土壤钾素不足。为研究秸秆还田替代钾肥的效果, 本文采用田间试验方法, 以常规施钾[135 kg(K_2O)·hm^{-2}]处理为对照, 研究了在秸秆粉碎翻压还田(6 000 kg·hm^{-2})条件下钾肥减量10%、20%、30%和40%对水稻钾素吸收累积量、水稻产量、钾肥偏生产力及经济效益的影响。结果表明: 在秸秆还田的基础上, 水稻植株的钾素含量和累积量随着钾肥施入量的减少而降低。钾肥施用量减少10%~40%, 水稻有效穗数、每穗粒数和结实率略有降低, 水稻产量和产值有所下降, 钾肥减量10%、20%和30%时, 对水稻产量和产值的影响不显著(P>0.05)。钾肥偏生产力随着钾肥施用量的减少而提高, 钾肥减量10%、20%、30%和40%处理的水稻钾肥偏生产力比不减钾处理分别提高8.4%、18.9%、33.8%和44.4%。总体而言, 在常规施钾条件下, 秸秆还田后随着减钾量(10%~40%)的增加, 水稻钾素累积量、产量和产值均呈下降趋势, 而钾肥偏生产力呈增加趋势; 减钾30%以内可显著提高水稻钾肥偏生产力(P<0.05), 对水稻产量及产值的影响不显著(P>0.05)。

关键词: 水稻; 秸秆还田; 钾肥减量; 产量; 偏生产力
中图分类号: S511　　**文献标识码:** A

Effects of reducing potassium fertilizer on yield and potassium use efficiency under wheat straw return conditions*

JIN Mengcan[1], ZHANG Shuyu[1], GAO Hongjian[1**], GAO Shifeng[2], WANG Yikun[3]

(1. Anhui Province Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention / School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Agricultural Technology Extension Center of Guohe Town of Lujiang County, Lujiang 200111, China; 3. Anhui Xiyangyang Agricultural Science and Technology Co., LTD, Lujaing 200111, China)

Abstract: There has been an increasing soil potassium deficiency in China. However, crop residues generally contain high levels of potassium that could replace part of the potassium fertilizer requirements after returning straw to the soil, and can therefore alleviate soil potassium deficiency. Crop residue return to field is an effective way to reduce the use of potash fertilizer, which also improves potassium use efficiency. In this study, field experiments were carried out to determine rice yield, potassium accumulation in rice, and partial factor productivity of potash fertilizer under conventional potash fertilizer application of 135 kg(K^2O)·hm^{-2} (control) and reductions by 10%, 20%, 30% and 40% after wheat straw incorporation (6 000 kg·hm^{-2}). The potassium content and the quantity of accumulated potassium in rice reduced with decreasing potassium fertilizer application after straw incorporation into the soil. The yield, economic benefit, effective panicle number, grains per panicle and seed-setting rate of rice declined with the reduction of conventional potassium fertilizer rate from 10% to 40%. However, when potassium fertilizer was reduced by less than 30%, there was little impact on 1000-grain weight of rice. It also had no significant effect on yield or economic benefit of rice (P > 0.05). Compared with conventional fertilization, treatments with chemical potash fertilizer reduction of 10%, 20%, 30% and 40% increased partial productivity increased by 8.4%, 18.9%, 33.8% and 44.4%, respectively. In summary, potassium accumulation in rice plant, rice yield and economic benefit decreased, whereas partial productivity of potassium increased with the reduction of conventional potassium dose from 10% to 40%. When wheat straw was applied and conventional potassium fertilization dose reduced by less than

* 国家重点研发计划项目(2013BAD07B08, 2016YFD020010703, 2016YFD0300901, 2016YFD030080103)资助
**通讯作者: 郜红建, 主要从事植物营养与施肥研究。E-mail: gaohongjian2@163.com
金梦灿, 主要从事养分资源高效利用方面的研究。E-mail: 2362935007@qq.com
收稿日期: 2017-2-16　接受日期: 2017-05-23
* This work was supported by the National Key R&D Project (2013BAD07B08, 2016YFD020010703, 2016YFD0300901, 2016YFD030080103).
**Corresponding author, E-mail: gaohongjian2@163.com
Received Feb. 16, 2017; accepted May 23, 2017

30%, partial productivity of potassium increased but had no significant effect on the yield and economic benefit of rice.

Keywords: Rice, Crop straw return, Potassium fertilizer reduction, Rice yield, Partial productivity

水稻(*Oryza sativa*)是我国重要的粮食作物之一，其种植面积和产量均居粮食作物首位[1]。钾素作为植物生长必需的三大矿质营养元素之一，是植物体内最丰富的阳离子，占植物干重的2%~10%[2]。钾离子在维持阴阳离子动态平衡、维持渗透压稳定、促进光合作用效率、作为酶的激活剂等植物各种生理生化过程代谢过程有关键的作用[3-6]。施用钾肥能改善水稻生长发育状况，有利稻株正常分蘖，提高结实率，千粒重和产量[7]，还可以提高水稻干物质累积量[8]和籽粒产量[9]，增加水稻对钾素等养分的吸收[10]，进而提高水稻养分利用效率[11]。

我国土壤全钾含量一般在16.6 g·kg^{-1}左右，但能被植物直接吸收利用的速效钾含量一般不超过全钾的2%[12]。近年来，我国土壤缺钾程度日渐加剧，缺钾面积逐渐增大，已经成为农业生产进一步发展的限制性因素。施用钾肥是缓解土壤钾素亏缺的直接途径，但我国钾肥资源匮乏，钾肥总量的50%~70%依赖进口[13]，施用成本较高。充分利用有机钾肥资源是弥补我国钾矿资源不足，补充土壤钾素亏缺的重要途径。我国是世界秸秆产量大国，年均秸秆资源量约8.11亿t，以水稻、玉米(*Zea mays*)和小麦(*Triticum aestivum*)秸秆为主，占秸秆总量的76.1%[14]。作物秸秆所吸收的钾素有80%左右留在秸秆中，约占秸秆干物质量的1.5%，是重要的钾肥资源[15]。秸秆还田可以提高土壤中水溶性钾、非交换性钾和矿物钾的含量，起到归还养分的作用，秸秆在腐解的过程中也可能促进矿物钾的释放，秸秆还田携入的钾可替代部分化肥施用[15-16]。王宏庭等[17]研究表明，在施用氮磷肥的基础上，增施钾肥结合秸秆还田是作物增产和保持土壤钾素肥力的重要措施。小麦秸秆还田后，使冬小麦增产6.6%以上，而钾肥结合小麦秸秆还田增产达17.6%。因此，秸秆还田后假设可以替代部分化学钾肥，可以减少钾肥施用量，对培肥地力、提高养分循环利用以及弥补钾肥不足等有重要意义。

以往的研究多关注秸秆还田对土壤肥力和水稻产量的影响，但有关秸秆还田后钾肥减量对水稻钾素累积及利用效率的影响研究较少。本研究采用田间试验法，研究了秸秆还田后钾肥减量 10%、20%、30%和40%条件下不同生育期水稻植株体内钾素含量和累积量的影响，分析了钾肥减量条件下水稻产量、经济效益与钾肥偏生产力的差异，以期为作物秸秆还田后的钾肥科学施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

田间试验选择在安徽省合肥市庐江县郭河镇南圩村(117°E，31°28N)，属于亚热带季风气候，冬冷夏热，春秋温和，年平均气温 15.7 ℃，日照约 2 100 h，年降雨量约 1 000 mm。该地区属于典型的圩区地貌，地势平坦，土壤肥沃，地力均匀，排灌通畅，适宜水稻种植。该地为小麦-水稻轮作制，前茬作物为小麦。试验田土壤养分含量：有机质含量 27.53 g·kg^{-1}，全氮含量 1.39 g·kg^{-1}，碱解氮含量 92.81 mg·kg^{-1}，速效磷含量 19.22 mg·kg^{-1}，速效钾含量 136.6 mg·kg^{-1}，土壤 pH 5.08。

1.2 试验设计

供试作物水稻的品种为'皖粳垦糯 2 号'。供试肥料有复合肥(15-15-15)、尿素(N 46%)、磷肥(P_2O_5 12%)和氯化钾(K_2O 60%)。

本试验共设 6 个处理，分别为：常规施肥(N-P_2O_5-K_2O=270-90-135 kg·hm^{-2})+秸秆还田+腐熟剂(T1)；常规施肥减钾 10%(N-P_2O_5-K_2O=270-90-121 kg·hm^{-2})+秸秆还田+腐熟剂(T2)；常规施肥减钾 20%(N-P_2O_5-K_2O=270-90-108 kg·hm^{-2})+秸秆还田+腐熟剂(T3)；常规施肥减钾 30%(N-P_2O_5-K_2O=270-90-94kg·hm^{-2})+秸秆还田+腐熟剂(T4)；常规施肥减钾 40%(N-P_2O_5-K_2O=270-90-82 kg·hm^{-2})+秸秆还田+腐熟剂(T5)；常规施肥不施钾(N-P_2O_5-K_2O=270-90-0 kg·hm^{-2})+秸秆还田+腐熟剂(T6)。氮肥的基肥、分蘖肥和穗肥的施用比例为 60%∶30%∶10%，磷肥全部做基肥施用，钾肥的基肥和穗肥施用比例为 80%∶20%。不同处理的施肥方案用复合肥(15-15-15)、尿素(含 N46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)和氯化钾(含 K_2O 60%)进行配比，常规施肥量为复合肥 600 kg·hm^{-2}，尿素 391 kg·hm^{-2}，氯化钾 75 kg·hm^{-2}。腐熟剂用量为 30 kg·hm^{-2}；小麦秸秆还田量约为 6000 kg·hm^{-2}，其中秸秆中全氮、全磷和全钾分别为 7.4 g·kg^{-1}、1.01 g·kg^{-1}、23.5 g·kg^{-1}。

1.3 材料种植与管理

试验共设置 6 个处理，每个处理设 3 次重复，随机区组排列，小区净面积为 100 m^2。在试验田周围作 2 m 宽的保护行，小区四周均作为田埂，并用农膜包埂，单独排灌，防止窜水窜肥。小麦于 2016 年 6 月 8 日联合收割机收获，秸秆粉碎还田，施用基肥及腐熟剂后，深旋翻埋，灌水浸泡 3~4 d。6 月 12—13 日落水再进行第 2 次旋耙，沉实 3 d。水稻于 2016 年 5 月 19 日播种，6 月 19 日移栽秧苗，11 月初收获。插植规格(行

株距)为 25 cm×12 cm，栽插密度 300 000 棵·hm^{-2}, 3 000 棵·小区$^{-1}$。成熟期取样考种，试验过程除各处理施肥量按照试验要求外，其他管理措施一致，各试验小区的病虫草害管理与大田相同。

1.4　测定项目与方法

在水稻生长的分蘖期、拔节期、抽穗期、成熟期分别从每个小区随机取 3 株水稻植株，先用自来水冲洗，再用蒸馏水冲洗干净，茎、叶、穗分别装入样品袋中在 105 ℃下杀青 30 min，然后在 75 ℃下烘干至恒重。植株样品粉碎后，用 H_2SO_4-H_2O_2 消煮，火焰光度计测定植株全钾含量。在水稻成熟期，统计有效穗、穗粒数、千粒重等产量构成因子。水稻植株不同生育期累积量和钾素利用效率采用以下方法计算：

钾素累积量(g·株$^{-1}$)=植株干重·钾含量　(1)

钾素总累积量 g·株$^{-1}$)=茎钾素累积量+叶钾素累积量+穗钾素累积量　(2)

钾素净累积量(g·株$^{-1}$)=后阶段钾素累积量−前阶段钾素累积量　(3)

钾肥偏生产力(kg·kg^{-1})=(施钾肥区作物产量−不施钾肥区作物产量)/施钾肥区作物产量　(4)

数据处理及作图使用 Microsoft Excel 2007，数据统计分析采用 SPSS 20.0，数据差异显著性分析采用 Duncan’s 法。

2　结果与分析

2.1　钾肥减量对水稻植株内钾素含量的影响

由表 1 可知，在不同生育期，水稻植株不同部位的钾素含量在不同钾肥水平下均呈现出茎部>叶片>穗部的规律，水稻植株不同部位的钾素含量随钾肥施用量的减少而呈下降趋势。在不同施肥处理中，秸秆还田后施用钾肥处理(T1、T2、T3、T4、T5)的水稻植株钾素含量均高于无钾对照处理(T6)，其中以秸秆还田后 100%钾肥处理(T1)中水稻钾素含量最高。在分蘖期，常规施肥处理(T1)的水稻茎中钾素含量为 56.58 g·kg^{-1}，分别比钾肥减量处理(T2、T3、T4、T5 和 T6)高 14.2%、14.5%、15.3%、15.8%和 19.2%，差异显著($P<0.05$)，但不同钾肥减量处理中的水稻茎和叶部钾素含量无显著性差异($P>0.05$)。在拔节期，水稻茎与叶的钾素含量呈现出 T1>T2>T3>T4>T5>T6 的规律，其中以 T1 处理最高，以无钾对照处理(T6)最低，无钾对照处理(T6)中水稻茎部的钾素含量显著低于钾肥减量处理($P<0.05$)。在抽穗期，水稻茎、叶、穗部的钾素含量均以常规施钾处理(T1)的最高，以无钾对照(T6)处理的最低，但各处理间差异不显著。在成熟期，水稻茎叶的钾素含量仍以 T1 最高，穗部钾素含量以钾肥减量 20%(T3)最高，以无钾处理(T6)最低。

表 1　秸秆还田下减施钾肥对不同生育期水稻体内全钾含量的影响

Table 1　Effects of straw returned to soil and reduced application of potassium on potassium contents in rice at different growth stages　g·kg^{-1}

处理	分蘖期 Tillering stage		拔节期 Jointing stage		抽穗期 Heading stage			成熟期 Mature stage		
Treatment	茎 Stem	叶 Leaf	茎 Stem	叶 Leaf	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Spike	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Spike
T1	56.58±1.66a	19.91±0.05a	44.74±1.90a	18.30±0.63a	47.14±0.20a	25.62±1.60a	17.00±0.94a	46.91±1.60a	12.93±0.07a	4.26±0.13a
T2	49.55±0.53b	19.48±0.23a	41.97±2.30b	18.27±0.0a	46.78±2.10a	25.54±0.87a	16.99±2.53a	44.56±0.96ab	12.58±1.86a	4.52±0.13a
T3	49.43±3.76b	19.47±0.74a	41.04±0.90b	18.22±0.05a	46.71±2.54a	25.32±2.95a	16.63±1.66a	41.55±2.88abc	12.49±0.40a	4.65±0.07a
T4	49.07±1.93b	19.23±0.21a	40.70±1.30b	18.15±0.01a	46.58±2.55a	25.23±0.05a	16.06±1.85a	38.19±2.45bc	12.25±1.80a	4.44±0.37a
T5	48.86±3.05b	18.69±0.95a	39.77±2.90b	18.02±0.04a	46.26±2.10a	25.09±1.72a	14.40±2.33a	37.01±2.27bc	12.17±2.3a	4.24±0.32a
T6	47.48±1.88b	18.96±0.45a	38.56±1.79c	17.98±0.36a	46.01±1.00a	24.92±1.50a	14.34±1.50a	36.92±0.64c	11.93±1.53a	4.01±0.36a

T1 为常规施肥+秸秆还田处理，T2~T6 分别为秸秆还田后常规施肥减钾 10%、20%、30%、40%，T6 为秸秆还田不施钾肥处理。同列不同字母表示 0.05 水平差异显著。T1 is conventional fertilization plus straw returned to soil treatment, T2 to T5 are treatments of 10%, 20%, 30% and 40% reduction of potassium of conventional fertilization plust straw returned soil, respectively. T6 is straw returned to sioil without potassium fertilizer treatment. Different letters within one column indicate significant differences at 0.05 level.

2.2　钾肥减量对水稻体内钾素累积量的影响

水稻钾素累积量随水稻生育期的推移而逐渐增加(图 1)，在成熟期达到最高值(0.73 g·株$^{-1}$~1.13 g·株$^{-1}$)，其中在分蘖期至拔节期和拔节期至抽穗期钾素总累积量增加迅速，抽穗期至成熟期钾素总累积量增加相对较缓。在各生育期，钾素累积量均以秸秆还田后 100%钾肥处理(T1)的最高，以无钾对照处理(T6)的最低，且随着钾肥减量幅度的增加而递减。在拔节期，秸秆还田后 100%钾肥处理(T1)中水稻钾素累积量略高于各减钾处理(T2、T3、T4、T5、T6)。在拔节期，秸秆还田后 100%钾肥处理(T1)的水稻钾素累积量显著高于各减钾处理(T2、T3、T4、T5、T6, $P<0.05$)，秸秆还田后钾肥减量 10%处理(T2)中水稻钾素累积量显著高于其他减钾处理(T3、T4、T5、T6, $P<0.05$)，但差异不显著($P>0.05$)。在抽穗期，秸秆还田后 100%钾肥处理(T1)中水稻钾素累积量显著高于各减钾处理(T2、T3、T4、T5、T6)($P<0.05$)，钾肥减量 10%(T2)与钾肥减量 20%(T3)及以上的各处理间水稻钾素累积量差异显著($P<0.05$)。但秸秆还田后钾肥减量 30%(T4)与钾肥减量 40%(T5)的处理间水稻钾素累积量无显著差异($P>0.05$)，在成熟期，各减钾处理(T2、T3、T4、T5、T6)的水稻钾素累

积量分别比100%钾肥处理(T1)降低了15.04%、22.12%、25.66%、28.31%和35.40%，差异达显著水平(P<0.05)。

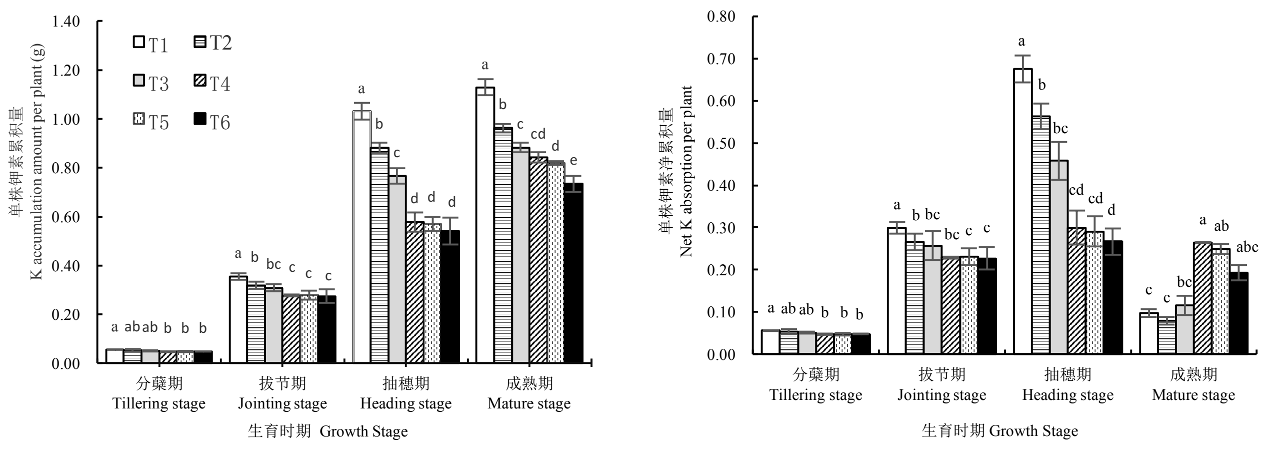


图 1 秸秆还田下减施钾肥处理对各生育期水稻钾素累积吸收量(a)和钾素净吸收量(b)的影响

Fig. 1 Effects of straw returned to soil and reduced application of potassium on potassium accumulation (a) and potassium net absorption (b) in rice at different growth stages

T1为常规施肥+秸秆还田处理，T2~T6分别为秸秆还田后常规施肥减钾10%、20%、30%、40%，T6为秸秆还田不施钾肥处理。同一生育时期不同字母表示0.05水平差异显著。T1 is conventional fertilization plus straw returned to soil treatment, T2 to T5 are treatments of 10%, 20%, 30% and 40% reduction of potassium of conventional fertilization plust straw returned soil, respectively. T6 is straw returned to sioil without potassium fertilizer treatment. Different letters for the same growth stage indicate significant differences at 0.05 level.

水稻植株体内钾素净累积量以抽穗期最多，占总累积量的35.50%~59.82%；其次是拔节期，占26.53%~30.8%(图1b)。在分蘖期，不同处理水稻植株钾素净累积量在0.047 9~0.056 1 g·株$^{-1}$之间，但各减钾处理间(T2~T6)没有显著差异(P>0.05)。在拔节期和抽穗期，水稻植株体内钾素净累积量随钾素减量比例的增加而逐渐降低，在钾肥减量10%~40%的处理中(T2~T5)水稻植株的钾素净累积量均显著低于钾肥100%用量处理(T1, P<0.05)。在成熟期，水稻植株的钾素净累积量呈现T4>T5>T6>T3>T1>T2的规律。

2.3 钾肥减量对水稻产量及其构成因子的影响

如表2所示，不同施肥处理的水稻产量呈现T1>T2>T3>T4>T5>T6的规律，其中以秸秆还田后100%钾肥处理(T1)最高，以无钾肥处理(T6)最低。水稻产量随钾肥减量比例增加而逐渐降低，减产幅度在2.5%~16.4%之间。钾肥减量40%(T5)与无钾肥处理(T6)的产量显著低于其他各施肥处理(P>0.05)，但T5与T6间无显著差异。从产量构成要素来看，不同施钾肥处理间水稻的有效穗数、每穗粒数和结实率随着钾肥施用量的减少而有所降低，有效穗数和结实率差异不显著(P>0.05)，T5和T6的每穗粒数显著低于T1(P<0.05)，不同施钾肥处理间水稻的千粒重无明显差异。

表 2 秸秆还田下减施钾肥处理对对水稻产量构成的影响

Table 2 Influence of straw returned to soil and reduced application of potassium on yield components of rice

处理 Treatment	有效穗数 Effective panicle number (10^3·hm^{-2})	每穗总粒数 Grains per panicle	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-kernel weight (g)	产量 Yield (kg·hm^{-2})
T1	3 488.26±17.31a	130.01±6.99a	91.77±1.27a	26.13±1.08a	9 119.20±383.06 a
T2	3 468.27±45.80a	120.50±0.90ab	91.83±1.86a	27.27±0.80a	8 894.21±318.13a
T3	3 463.27±39.67a	120.12±8.90ab	91.40±3.28a	26.87±0.45a	8 671.35±497.68a
T4	3 458.27±91.61a	118.99±3.32ab	91.33±1.19a	26.73±0.47a	8 537.51±228.73ab
T5	3 448.28±108.11a	111.18±2.94b	91.10±4.15a	26.60±0.87a	7 898.91±420.92bc
T6	3 443.28±8.66a	110.43±9.82b	90.70±2.56a	26.03±0.64a	7 623.46±390.39c

T1为常规施肥+秸秆还田处理，T2~T6分别为秸秆还田后常规施肥减钾10%、20%、30%、40%，T6为秸秆还田不施钾肥处理。同列不同字母表示0.05水平差异显著。T1 is conventional fertilization plus straw returned to soil treatment, T2 to T5 are treatments of 10%, 20%, 30% and 40% reduction of potassium of conventional fertilization plust straw returned soil, respectively. T6 is straw returned to soil without potassium fertilizer treatment. Different letters within one column indicate significant differences at 0.05 level.

2.4 钾肥减量对水稻经济效益及钾肥偏生产力的影响

随着钾肥施用量的减少，肥料投入成本和水稻产值不断降低，钾肥偏生产力逐渐升高(表3)。秸秆还田后100%钾肥处理(T1)的水稻产值最高，无钾肥处理(T6)的水稻产值最低，各钾肥减量处理(T2、T3、T4、T5、T6)的水稻产值分别比T1降低了2.5%、4.9%、6.3%1、3.4%和16.4%。在不同钾肥减量处理中，钾肥减量10%~30%(T2、T3和T4)与不减钾处理(T1)的水稻产值之间无显著性差异(P>0.05)，钾肥减量40%(T5)与无钾肥(T6)处理的水稻产值无显著性差异(P>0.05)。所有施钾肥处理中，以减钾40%处理(T5)的钾肥偏生产力最高，不减钾处理(T1)的钾肥偏生产力最低，不同钾肥减量处理(T2、T3、T4和T5)分别比不减钾处理

(T1)的钾肥偏生产力提高了 8.4%、18.9%、33.8%和 44.4%。

表 3　不同施肥处理对水稻经济效益及钾肥偏生产力的影响

Table 3　Influence of different fertilization practices on economic effects of rice and partial factor productivity of applied K_2O

处理 Treatment	施钾量 K fertilizer rate (kg·hm^{-2})	肥料投入 Fertilizer input (¥·hm^{-2})	产值 Output (¥·hm^{-2})	钾肥偏生产力 Partial factor productivity of K fertilizer (kg·kg^{-1})
1	135	2 744.52	23 709.91±995.95a	1013.24±42.56e
T2	121	2 677.96	23 124.95±827.13a	1098.05±39.28d
T3	108	2 611.39	22 545.51±1 293.97a	1204.35±69.12c
T4	94	2 544.83	22 197.53±594.69ab	1355.16±36.31b
T5	81	2 450.07	20 537.17±1 094.4bc	1462.76±77.95a
T6	0	1 797.45	19 821.01±1 015.01c	—

T1 为常规施肥+秸秆还田处理, T2~T6 分别为秸秆还田后常规施肥减钾 10%、20%、30%、40%, T6 为秸秆还田不施钾肥处理。尿素、过磷酸钙、氯化钾和复合肥的成本分别按 2.08 ¥·kg^{-1}、0.77 ¥·kg^{-1}、2.96 ¥·kg^{-1} 和 2.85 ¥·kg^{-1}, 稻谷按 2.6 ¥·kg^{-1} 计, 人工等未计入成本。同列不同字母表示 0.05 水平差异显著。T1 is conventional fertilization plus straw returned to soil treatment, T2 to T5 are treatments of 10%, 20%, 30% and 40% reduction of potassium of conventional fertilization plus straw returned soil, respectively. T6 is straw returned to soil without potassium fertilizer treatment. The prices of urea, superphosphate, potassium chloride and compound fertilizer are 2.08 ¥·kg^{-1}, 0.77 ¥·kg^{-1}, 2.96 ¥·kg^{-1} and 2.85 ¥·kg^{-1}. The price of rice is 2.6 ¥·kg^{-1}. Other inputs, such as labor, are not taken into the account of cost. Different letters within one column indicate significant differences at 0.05 level.

3　讨论

3.1　钾肥减量对水稻钾素吸收的影响

钾是作物生长必需的三要素之一, 其吸收和分配对水稻的生长和发育有很大的影响[18]。水稻植株对钾素的吸收积累呈现在分蘖期缓慢增加, 拔节期快速增加, 抽穗期达到高峰, 而后逐渐下降的规律[19]。严莲英等[20]研究表明, 水稻植株体内的钾素含量随生育期的延迟呈下降趋势。本研究显示, 在分蘖期和拔节期, 钾肥减量 10%~40%的水稻植株茎部钾素含量比钾肥不减量处理显著降低, 而在抽穗期和成熟期, 差异不明显。这可能是因为: 在水稻生长初期, 化学钾肥施用加大了土体与根表间的钾素浓度梯度, 使钾素向根表的扩散迁移量增加[21], 促进了水稻植株对钾素的吸收。钾肥减量降低了土壤速效钾的含量, 而秸秆钾的释放需要一定时间, 使水稻生长前期钾素吸收量降低[22]。秸秆还田后, 钾素逐步释放, 部分替代了化肥钾的功效[23], 提高了土壤速效钾的含量和水稻对钾的吸收, 使减钾处理与不减钾处理中水稻植株茎部的钾素含量差异减小。

随着钾肥施用量的减少, 水稻钾素累积量在不同生育期都呈现出递减的规律, 越到水稻生育后期, 差异越明显。张玉屏等[9]研究表明, 不同水稻品种植株钾素累积量均随着施钾量的增加而增加, 这与本研究的结果相似。这可能是因为, 化肥钾进入土壤后能被水-土体系容纳和吸附, 部分钾离子被黏土矿物固定, 转变为非交换态, 使土壤速效钾含量下降, 降低了作物生育前期对钾的吸收利用。作物秸秆在腐解过程中, 释放钾的同时也释放出水合半径与 K^+接近的 Na^+和 NH_4^+等陪伴阳离子, 侵占土壤黏土矿物的部分层间吸附位点, 减少秸秆钾的固定量[15]。当秸秆释放钾和化肥钾的数量小于土壤黏土矿物固定钾的数量时, 表现为土壤水溶钾含量降低, 作物吸收累积量减少; 反之, 土壤水溶钾含量提高, 作物吸收累积量增加。

3.2　钾肥减量对水稻产量及其构成因子的影响

本研究表明, 减钾处理下水稻的有效穗、每穗粒数和结实率呈减少趋势, 从而导致产量有所降低。胡泓等[24]研究表明, 钾肥的施用使水稻的有效穗数和每穗粒数增加。袁玲等[25]研究发现, 钾素营养的减少降低了植物体内的细胞分裂素, 影响受精体的发育, 从而使水稻空壳率增加, 结实率降低。李良勇等[26-27]研究表明, 土壤施入外源钾, 可以增加细胞分裂素对植物生长的促进作用, 进而产生更多的一级和二级枝梗分生组织, 最终导致每穗籽粒和结实率的增加。这说明钾素主要通过增加水稻的有效穗数、每穗粒数和结实率来提高水稻的产量。本研究表明, 在秸秆还田的条件下, 当钾肥减量 10%~30%, 水稻产量与钾肥不减量处理差异不显著; 钾肥减量达到 40%时, 水稻产量比不减钾处理显著降低。这说明在秸秆还田条件下, 钾肥减量超过常规施钾量的 30%后, 秸秆释放的钾素不能完全替代化学钾的功效, 造成水稻产量下降。

3.3　钾肥减量对水稻经济效益及钾肥偏生产力的影响

秸秆还田条件下, 水稻生产成本随着施钾量的减少而降低, 产值则随着产量的增加而增加。常规施肥成本最高, 产值也最高。钾肥减量处理的产值低于不减钾处理, 说明钾肥减量会在不同程度上降低水稻产值, 但在秸秆还田条件下, 秸秆钾的释放能部分替代化学钾肥, 当钾肥减量幅度低于 30%时, 钾肥减量对水稻产值影响不显著。

肥料偏生产力是反映当地土壤基础养分和化肥施用量综合效应的重要指标, 是评价肥料效应的适宜参数[28]。王伟妮等[29]认为, 钾肥偏生产力与施钾量呈显著的负相关关系, 与施钾后的稻谷产量呈正相关关系。

本研究结果表明：钾肥偏生产力随着钾肥施用量的减少而增加，钾肥偏生产力以钾肥不减量处理最小，以钾肥减量 40%处理最大。施钾量越少，水稻对肥料中钾素的依存率越低，对土壤中钾素的依存率越高。

综上所述，减少钾肥的施用量会降低不同生育期水稻植株体内钾素的含量和积累量，水稻有效穗数、每穗粒数和结实率减少，从而在不同程度上降低水稻产量和产值。化肥钾的高投入虽然能在一定程度上提高粮食作物的产量，但化肥钾投入量过多，钾素会转化为非交换态，也大大地增加了钾肥资源的消耗[30]。秸秆还田后，在释放钾的同时也会释放出 Na^+和 NH_4^+等伴随阳离子，减少秸秆钾的固定，从而更好的被植物吸收利用。从钾肥偏生产力、生产成本、水稻产值等方面综合考虑，在秸秆还田的基础上，常规施肥减钾 30%(T4)以内，可以降低钾肥施用成本，提高钾肥偏生产力。

4 结论

1)在秸秆还田的条件下，水稻植株体内的钾素含量和钾素累积量随着钾肥施用量的减少而呈下降趋势，且越到水稻的生育后期，差异越明显。

2)在秸秆还田的基础上减施钾肥，会在不同程度上影响水稻有效穗数、每穗粒数和结实率，进而影响水稻产量。秸秆还田基础上钾肥减量低于 30%时，对水稻产量的影响不显著(P>0.05)。

3)从水稻的产量和收益来看，常规施肥(T1)效果最好，但从水稻的生产成本、产值、钾肥利用率和可持续发展等角度综合考虑，秸秆还田条件下，常规施肥减钾 30%可以降低钾肥施用成本，提高钾肥偏生产力。

参考文献 References

[1] 李初军，刘建萍，贾丽颖，等. 我国水稻育种的现状与展望[J]. 中国种业, 2007, (1): 11–12
Li C J, Liu J P, Jia L Y, et al. Current situation and preview of rice seed breeding in China[J]. China Seed Industry, 2007, (1): 11–12

[2] Gierth M, Mäser P. Potassium transporters in plants-involvement in K^+ acquisition, redistribution and homeostasis[J]. FEBS Letters, 2007, 581(12): 2348–2356

[3] Amtmann A, Hammond J P, Armengaud P, et al. Nutrient sensing and signaling in plants: Potassium and phosphorus[J]. Advances in Botanical Research, 2005, 43: 209–257

[4]Wang Y, Wu W H. Potassium transport and signaling in higher plants[J]. Annual Review of Plant Biology, 2013, 64: 451–476

[5] Hawkesford M, Horst W, Kichey T, et al. Functions of macronutrients[M]//Marschner P. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. 3rd ed. London: Academic Press, 2012: 135–189

[6] Anschütz U, Becker D, Shabala S. Going beyond nutrition: regulation of potassium homoeostasis as a common denominator of plant adaptive responses to environment[J]. Journal of plant physiology, 2014, 171(9): 670–687

[7] 张洋洋，鲁剑巍，王友珠，等. 钾肥施用方式对直播和移栽水稻产量和钾肥利用效率的影响[J]. 作物杂志, 2016, (1): 110–114
Zhang Y Y, Lu J W, Wang Y Z, et al. Effects of potassium fertilizer application method on yield and potassium apparent efficiency of direct-sowing rice and transplanting rice[J]. Crops, 2016, (1): 110–114

[8] 索巍巍，付立东，王宇，等. 钾肥对水稻产量及钾肥利用率的影响[J]. 北方水稻, 2014, 44(2): 18–21
Suo W W, Fu L D, Wang Y, et al. Effect of potash fertilizer on rice yield and ratio of potash fertilizer utilization[J]. North Rice, 2014, 44(2): 18–21

[9] 张玉屏，曹卫星，朱德峰，等. 红壤稻田钾肥施用量对超级稻生长及产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(6): 633–638
Zhang Y P, Cao W X, Zhu D F, et al. Effects of potassium fertilizer rate on growth and yield formation of super high yielding rice in red paddy soil[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2009, 23(6): 633–638

[10] 陈敏，马婷婷，丁艳萍，等. 配方施肥对水稻养分吸收动态及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 237–246
Chen M, Ma T T, Ding Y P, et al. Effects of formula fertilizer application on nutrient uptake and grain yield of rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2014, 20(1): 237–246

[11] 王伟妮，鲁剑巍，何予卿，等. 氮、磷、钾肥对水稻产量、品质及养分吸收利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(6): 645–653
Wang W N, Lu J W, He Y Q, et al. Effects of N, P, K fertilizer application on grain yield, quality, nutrient uptake and utilization of rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2011, 25(6): 645–653

[12] 占丽平，李小坤，鲁剑巍，等. 土壤钾素运移的影响因素研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(4): 548–553
Zhan L P, Li X K, Lu J W, et al. Research advances on influence factors of soil potassium movement[J]. Soils, 2012, 44(4): 548–553

[13] 亓昭英，段盛青，刘富昌，等. 近几年我国钾肥生产供应现状与发展预测[J]. 磷肥与复肥, 2012, 27(6): 1–3
Qi Z Y, Duan S Q, Liu F C, et al. Production and supply of potash fertilizer in China in the recent years and its development forecast[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2012, 27(6): 1–3

[14] 高祥照，马文奇，马常宝，等. 中国作物秸秆资源利用现状分析[J]. 华中农业大学学报, 2002, 21(3): 242–247

Gao X Z, Ma W Q, Ma C B, et al. Analysis on the current status of utilization of crop straw in China[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2002, 21(3): 242–247
[15] 李继福, 任涛, 鲁剑巍, 等. 水稻秸秆钾与化肥钾释放与分布特征模拟研究[J]. 土壤, 2013, 45(6): 1017–1022
Li J F, Ren T, Lu J W, et al. Study on characteristics of release and distribution of rice straw potassium and chemical potassium by lab simulation[J]. Soils, 2013, 45(6): 1017–1022
[16] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 长期施钾与秸秆还田对华北潮土和褐土区作物产量及土壤钾素的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 106–112
Tan D S, Jin J Y, Huang S W, et al. Effect of long-term application of potassium fertilizer and wheat straw to soil on yield of crops and soil potassium in fluvo-aquic soil and brown soil of northcentral China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(1): 106–112
[17] 王宏庭, 金继运, 王斌, 等. 山西褐土长期施钾和秸秆还田对冬小麦产量和钾素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 801–808
Wang H T, Jin J Y, Wang B, et al. Effects of long-term potassium application and wheat straw return to cinnamon soil on wheat yields and soil potassium balance in Shanxi[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(4): 801–808
[18] 贺梅, 张文忠, 宋桂云, 等. 钾肥对高产水稻生长发育的影响[J]. 辽宁农业科学, 2007, (1): 12–14
He M, Zhang W Z, Song G Y, et al. Effect of potassium on growth and development of high-yield rice[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2007, (1): 12–14
[19] 张相林, 姜福臣, 李淑芹, 等. 水稻吸钾规律与钾素平衡的研究[J]. 东北农业大学学报, 1994, 25(4): 319–327
Zhang X L, Jiang F C, Li S Q, et al. Studies on K uptake regularity of rice plant and K balance[J]. Journal of Northwest Agricultural University, 1994, 25(4): 319–327
[20] 严莲英, 秦松, 杨桂兰, 等. 氮、钾肥后移施用对超高产水稻产量及其构成因素和养分含量的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29(1): 103–108
Yan L Y, Qin S, Yang G L, et al. Effects of postponing nitrogen and potassium application on yield, yield components and nutrient content of super high-yielding rice[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29(1): 103–108
[21]刘会玲, 陈亚恒, 段毅力, 等. 土壤钾素研究进展[J]. 河北农业大学学报, 2002, 25(S1): 66–68
Liu H L, Chen Y H, Duan Y L, et al. The advance of soil potassium[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2002, 25(S1): 66–68
[22]姜超强, 郑青松, 祖朝龙. 秸秆还田对土壤钾素的影响及其替代钾肥效应研究进展[J]. 生态学杂志, 2015, 34(4): 1158–1165
Jiang C Q, Zheng Q S, Zu C L. Research progress on effects of straw returning on soil potassium and its substitute for potassium fertilizer[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(4): 1158–1165
[23]廖育林, 郑圣先, 聂军, 等. 长期施用化肥和稻草对红壤水稻土肥力和生产力持续性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(10): 3541–3550
Liao Y L, Zheng S X, Nie J, et al. Effects of long-term application of fertilizer and rice straw on soil fertility and sustainability of a reddish paddy soil productivity[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(10): 3541–3550
[24] 胡泓, 王光火. 钾肥对杂交水稻养分积累以及生理效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(2): 184–189
Hu H, Wang G H. Influence of potassium fertilizer on nutrient accumulation and physiological efficiency of hybrid rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(2): 184–189
[25]袁玲, 黄建国. 钾对水稻籽粒发育中激素变化的影响[J]. 西南农业大学学报, 1993, 15(1): 38–41
Yuan L, Huang J G. Effects of potassium on the variation of hormones in developing hybrid rice seeds[J]. Journal of Southwest University, 1993, 15(1): 38–41
[26]李良勇, 崔国贤. 营养胁迫下植物内源激素变化研究进展[J]. 作物研究, 2002, (S1): 29–33
Li L Y, Cui G X. Advances in studies on endogenous hormones in plants under nutrient stress[J]. Crop Research, 2002, (S1): 29–33
[27]Ashikari M, Sakakibara H, Lin S Y, et al. Cytokinin oxidase regulates rice grain production[J]. Science, 2005, 309(5735): 741–745
[28] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915–924
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915–924
[29] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 湖北省早、中、晚稻施钾增产效应及钾肥利用率研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1058–1065
Wang W N, Lu J W, Lu M X, et al. Effects of potassium fertilizer and potassium use efficiency on early-, mid-and late-season rice in Hubei Province, China. [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2011, 17(5): 1058–1065